

声呐基阵设计原理

李贵斌 著

海洋出版社

253

DG 61-080

声呐基阵设计原理

李青斌 著

海洋出版社

1992年·北京

4014883

内 容 提 要

基阵设计是提高声呐系统空间处理增益的主要手段,本书以接收阵为主体,围绕着基阵的方向性因子和空间处理增益展开讨论。详细论述了目前人们感兴趣的各种阵型,如随机阵、加权阵、相集阵、宽带阵、离散扫描阵、自适应阵。既介绍了各种阵型的参数计算和设计方法,又讨论了其原理、功能、敏感性、统计误差、互辐射效应和速度控制等问题。

本书内容丰富,有一定的广度和深度,既可作为大专院校有关专业的教学参考书,又适应于从事声学研究的科技人员参阅。

责任编辑 陈泽卿

(京)新登字087号

声呐基阵设计原理

李贵斌 著

海洋出版社出版(北京市复兴门外大街1号)

新华书店北京发行所发行 建华印刷厂印刷

开本:787×1092 1/32 印张:18.125 字数:420千字

1993年1月第一版 1993年1月第一次印刷

印数:1—400

ISBN 7-5027-0009-9/O·1 定价:14.80元

前 言

50年代以来，基阵设计一直成为水声工程的主要内容之一，对声呐系统的发展产生了巨大的影响。今天，水声学研究上所取得的成果，如果没有基阵的大力辅助，是难以获得的。

《声呐基阵设计原理》一书是作者多年教学及科研工作的总结，书中所涉及的内容是目前基阵设计中所关心的带有普遍性的问题。本书以接收阵为主体，各章基本上都围绕着方向性因子（或功率响应因子）和空间处理增益展开讨论。

在写法上力求用统一的数学方法——矩阵和空间滤波器的概念，分析基阵设计中的各类问题。这样做的结果，使得书中所分析的问题的物理和数学概念都是清晰的；理论上，处理方法比较统一，且便于用计算机进行数值计算。

在内容安排上采用了综述和分章叙述的方法。第一章用综述的方法简述了基阵设计中所涉及的主要方面，使读者在阅读各章之前，首先有一个完整的初步概念，并为阅读以下各章提供了预备知识和总体概念。第二章用传统的方法（图解法）研究分析了常规几何形状的基阵方向性图。第三章用概率统计方法研究了随机基阵。第四章讨论了加权阵的各种处理方法。第五、六章分别讨论了相乘阵和宽带阵，既给出了不同情况下的各种相乘阵，又给出了宽带阵的一般概念及其设计方法。第七、八章分别讨论了基阵的空间处理增益和离散扫描阵的有关问题，并给出了大量的设计实例。第九章着

4014883

重分析了常规阵和最佳阵的敏感性和统计误差。第十章介绍了波束形成和自适应原理及其在基阵设计中的应用。第十一章阐叙了发射基阵的互辐射效应和速控的有关问题。

为了使读者能更好地了解基阵设计的原理及方法，并了解各种基阵的性能和用途，很有必要使全书各章有一定的独立性。这样做对从事基阵设计的科技人员来说，也许会带来很大的方便。书中为了体现“设计”两字的含义，引入了作者本人进行基阵设计时，用计算机进行数值计算出的大量图表，供实际设计参考。

由于声呐基阵的发展较慢，目前尚未见这方面的专著出版，有关文献散见在不同领域的杂志里。作者虽做了很大的努力，试图以完整的专著形式奉献给读者，但由于本人的水平有限，难免有许多不妥之处，恳请广大读者在阅读中随时提出批评和指正。

全书完稿后，曾得到声学研究所关定华所长、哈尔滨船舶工程学院周福洪教授的热情支持和有益指导。王广恩同志按作者的意图提供了第三章和第十一章的初稿，在此一并表示谢意。

李贵斌

1985年7月于北京

目 录

第一章 概述	(1)
§ 1.1 基阵的作用	(1)
§ 1.2 研究基阵的方法	(4)
§ 1.3 基阵方向性形成的机理	(6)
§ 1.4 极大值的出现和波束形成	(8)
§ 1.5 方向性因子的矩阵表示法	(10)
§ 1.6 多波束形成	(13)
§ 1.7 空间滤波器的概念	(14)
§ 1.8 基元有方向性时基阵的方向性因子	(16)
§ 1.9 功率响应因子	(21)
§ 1.10 宽带功率响应因子.....	(25)
§ 1.11 恒定束宽阵的设计思想.....	(30)
§ 1.12 信号场、噪声场及基阵处理器的数学 描述.....	(35)
第二章 单一型和组合型基阵	(51)
§ 2.1 一维阵型	(51)
§ 2.2 二维阵型	(63)
§ 2.3 三维阵型	(76)
§ 2.4 线面组合基阵	(80)
§ 2.5 圆形组合基阵	(87)
第三章 随机基阵	(97)
§ 3.1 问题的提出与背景	(97)

§ 3.2	随机基阵的统计平均值.....	(99)
§ 3.3	旁瓣幅度的概率密度.....	(106)
§ 3.4	峰旁瓣的估计量 B	(113)
§ 3.5	估计量 B 的数学期望和方差.....	(120)
§ 3.6	估计量 B 的定量分析.....	(123)
§ 3.7	几个设计因素对随机基阵峰旁瓣的影响	(128)
第四章	加权阵	(136)
§ 4.1	加权处理的一般方法.....	(136)
§ 4.2	代入法.....	(141)
§ 4.3	反变换法.....	(148)
§ 4.4	函数逼近法.....	(151)
§ 4.5	非均匀组合基阵.....	(159)
§ 4.6	非线性规划 —— 优选法.....	(167)
§ 4.7	有关振幅加权和相位加权的一些问题	(173)
第五章	相乘阵	(179)
§ 5.1	产生 $\sin x/x$ 型的相乘阵	(180)
§ 5.2	线阵组成的分裂相乘阵.....	(184)
§ 5.3	时间平均相乘阵.....	(188)
§ 5.4	双基元合成多基元阵.....	(194)
第六章	宽带阵	(205)
§ 6.1	宽带阵的一般概念及实例.....	(205)
§ 6.2	恒定束宽阵的设计方法.....	(227)
§ 6.3	利用傅氏变换实现恒定束宽阵.....	(236)
§ 6.4	线性组合恒定束宽阵.....	(244)
§ 6.5	乘幂恒定束宽阵.....	(255)

§ 6.6	低频归一波形估计恒定束宽阵	(264)
第七章	基阵的空间处理增益	(291)
§ 7.1	基阵的空间相关性	(291)
§ 7.2	设计举例	(303)
§ 7.3	连续型基阵的处理增益	(319)
§ 7.4	轴向集中系数和空间处理增益 的比较	(323)
第八章	离散扫描阵	(329)
§ 8.1	概述	(329)
§ 8.2	功率响应因子	(332)
§ 8.3	功率响应因子的计算举例	(347)
§ 8.4	空间处理增益	(360)
§ 8.5	空间处理增益的计算举例	(368)
第九章	基阵处理器的敏感性和误差	(395)
§ 9.1	常规阵与最佳阵的性能比较	(395)
§ 9.2	最佳阵处理增益的敏感性和统计 误差	(408)
§ 9.3	信号抑制	(431)
§ 9.4	数值计算举例	(440)
第十章	波束形成器	(460)
§ 10.1	单、多波束系统的原理和功能	(461)
§ 10.2	时域波束形成器	(477)
§ 10.3	频域波束形成器	(488)
§ 10.4	自适应波束形成器	(491)
第十一章	声呐发射基阵的互辐射效应与速度控制	(503)
§ 11.1	互辐射效应的分析	(503)

§ 11.2	互辐射阻抗及其系数	(508)
§ 11.3	各种形式基阵的互辐射阻抗系数	(511)
§ 11.4	发射基阵方程	(532)
§ 11.5	实际计算举例	(538)
§ 11.6	速度控制方法与分析	(542)

第一章 概 述

§ 1.1 基阵的作用

信号处理系统大致分为时间处理器和空间处理器两种。时-空处理器的目的是利用信号和干扰噪声之间,在时间(或频谱)和空间特性上的差异,把弱信号从干扰背景中提取出来。时间处理器仅利用它们在时间上的差异,以获得时间处理增益。在白噪声的条件下,所获得的最大时间处理增益为 $2WT$ (其中, W 为接收系统的等效带宽, T 为系统的积分时间)。从信号和噪声的空间特性上可以看出,信号可认为是远场的平面波,而干扰噪声却认为是各个方向入射平面波声场的线性迭加。这种不同的空间特性,使我们可以利用基阵对声场进行空间处理,以获得空间处理增益。由此可见,基阵在声呐系统中的作用是相当重要的。

在声呐中,基阵设计主要解决两类问题。

第一类问题是对目标进行定位、定向和测速,为此要求:

- 1) 波束的形成。利用基阵形成波束,以确定目标的方向。
- 2) 降低波束方向性的旁瓣。旁瓣的存在可能产生虚假的目标方位,同时可能使近场强干扰信号影响了远场弱信号的接收。
- 3) 具有一定的搜索扇面和搜索速度。过去常用机械法

使波束在空间旋转，现在多采用多波束形成方法。

4) 测定目标速度，并跟踪目标。

第二类问题是提高空间处理增益，以提高接收机输入端（即基阵系统的输出端）的信噪比。基阵的这一作用，可从声呐方程中得到进一步的说明。

根据不同的情况，声呐方程给出了声学参数和设备参数之间的关系。

被动声呐的声呐方程为

$$SL - TL - (NL - DI) = DT$$

主动声呐的声呐方程，以噪声干扰为主时为

$$SL - 2TL + TS - NL + DI = DT$$

以混响干扰为主时为

$$SL - 2TL + TS - RL = DT$$

其中 SL 为声源级，可表示为

$$SL = 71 + 10 \lg P_0 + DI_r$$

在这里， P_0 是声源功率； DI_r 称为发射换能器的方向性指数，即

$$DI_r \triangleq 10 \lg \nu$$

ν 为轴向集中系数，定义为

$$\nu \triangleq I_0 / I$$

I_0 为换能器有指向性时，在轴向方向的发射功率； I 为换能器无指向性时，在轴向方向的发射功率。显然， ν 表示了发射换能器有指向性后，能量集中的程度。

检测阈 DT 表示接收机能作出有无信号判决时，在其输入端所需的最小信噪比。

DI 称为接收基阵的方向性指数,反映接收基阵抑制噪声的能力,即空间处理增益。

$$DI = 10 \lg \frac{\text{等效的无指向性时的噪声功率}}{\text{有指向性时的噪声功率}}$$

所以声源级 SL 、检测阈 DT 和接收基阵方向性指数 DI 均为设备参数。

声呐方程中还有信号在传播过程中的传播损失 TL ,被探测目标的反射本领 TS ,目标噪声源的噪声级 NL 和混响级 RL 。这些参数都是与传播介质和目标特性有关的声学参数。它们是不能人为调整的客观特性或规律,确定其规律是水声物理学的任务。如何在给定的声学参数下,合理设计声呐设备参数,则是声呐工程设计面临的主要问题。

从以噪声干扰为主的主动声呐的声呐方程可以看到,背景干扰级为 NL ,而被接收到的信号级为 EL

$$EL \triangleq SL - 2TL + TS$$

因此,声呐方程可改写为

$$EL - NL = DT - DI$$

DT 和 DI 就描述了系统增强信号能量和抑制噪声能量的处理能力,时间处理器可简单地由 DT 来描述,空间处理器用 DI 来描述,而时-空处理器则要用 $DT-DI$ 来描述。实际上,在现代声呐中,往往不可把 DT 和 DI 区别开来。

分析基阵就是分析 DI 的性质和能力。对发射基阵而言, DI 越大,发射能量就愈集中;对接收基阵来说, DI 越大,一般方向性图愈尖,系统抑制噪声干扰的能力也就越强,系统所获得的空间处理增益就更大。由此可见,当基阵系统的 DI 增大时,若保持信号级 EL 不变,则可降低检测阈

DT ，这就降低了对设备的设计要求；若保持 DT 不变，就可以增大 EL ，即增加系统的作用距离。我们从声呐方程的分析中，也就是从平均能量的观点上，进一步认识到设计基阵系统对获取空间处理增益的作用。

§1.2 研究基阵的方法

在下面对基阵的讨论中，引入的近似条件为：

对于平面波入射，若声源到基阵的距离为 r ，基阵本身的线度为 l （见图1.1），这时要求 $r \gg l$ ；

同时，设声波波长为 λ ，则满足远场条件（即非干涉场）为 $r \gg l^2/\lambda$ ；

仅考虑自由场，不考虑多途径反射和散射。

认为基元本身是无指向性的。即基元尺寸 a 满足条件 $a \ll \lambda$ 。

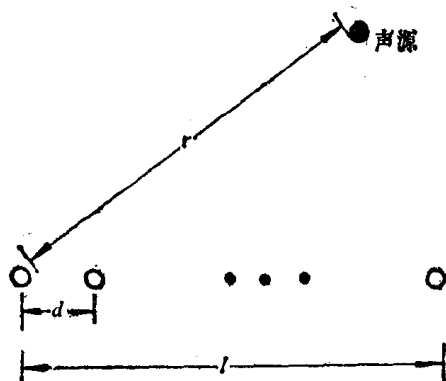


图 1.1

通常给出的基阵方向性图分别是窄带情况和宽带情况。

当平面波入射时, 基元的接收声压为

$$P = ae^{j(\omega t - kx)} = ae^{j(\omega t - \tau)} = ae^{j\omega t} e^{-jkx}$$

其中相位 ϕ 可以表示为

$$\phi = kx = \frac{2\pi}{\lambda} x = 2\pi f \frac{x}{c} = \omega \tau$$

式中, k 为波数; f 为声波频率; c 为声速; x 为声波的传播距离; τ 为传播时间; a 为声压振幅。

$e^{j\omega t}$ 为振动因子, 一般对方向性没有影响, 所以在以后讨论方向性时可略去不计, 而仅引入归一化声压

$$V = e^{-j\omega \tau}$$

当基阵由 M 个基元组成, 第 i 个基元接收的归一化声压为(以第1号基元为参考点)

$$V_i = e^{-j\omega \tau_i} \quad i=1, 2, \dots, M$$

利用矢量表示, 接收声压的矢量 V 为

$$V = [e^{-j\omega \tau_1}, e^{-j\omega \tau_2}, \dots, e^{-j\omega \tau_i}, \dots, e^{-j\omega \tau_M}]^T$$

其协方差矩阵为并矢型

$$VV^* = \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\omega \tau_{12}} & \dots & e^{-j\omega \tau_{1M}} \\ e^{-j\omega \tau_{21}} & 1 & \dots & e^{-j\omega \tau_{2M}} \\ \vdots & & & \\ e^{-j\omega \tau_{M1}} & e^{-j\omega \tau_{M2}} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

其中

$$\tau_{ij} \triangleq \tau_i - \tau_j$$

有时为了表示各基元声压振幅的不同, 就得采用非归一化表示式, 将基元接收声压表示为

$$p_i = a_i V_i$$

归一化协方差矩阵形式上用外积表示为

$$Q = V \cdot V^{*T}$$

§ 1.3 基阵方向性形成的机理

为简单起见, 仅讨论远场归一化点源的情况。这时在两个接收点可近似地看成平面波, 不考虑振动因子, 得到

$$V_1 = e^{-j\varphi_1} \quad V_2 = e^{-j\varphi_2}$$

合成声压 V 的振幅为

$$\begin{aligned} |V| &= |V_1 + V_2| = |e^{-j\varphi_1} + e^{-j\varphi_2}| \\ &= \sqrt{(\cos\varphi_1 + \cos\varphi_2)^2 + (\sin\varphi_1 + \sin\varphi_2)^2} \\ &= \sqrt{2 + 2[\cos\varphi_1 \cos\varphi_2 + \sin\varphi_1 \sin\varphi_2]} \\ &= 2\cos\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \triangleq 2\cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \end{aligned}$$

这就表示, 接收点声压振幅是随 $\Delta\varphi$ 的变化而出现极大、极小值。这种变化实质上是因为远场声源到接收点的声程不同, 导致声压相位的差异而造成的。

接收基阵之所以具有方向性, 是由于多个接收基元, 在空间的不同位置上接收到相位不同的声压。对这些相位不同的声压进行线性相加后, 其声压振幅随声程的不同而呈现极大、极小值的变化, 就对应于接收基阵中各基元的接收声压迭加后的振幅, 随入射波方向变化而呈现极大、极小值的变化。

设远场所辐射的声波, 以入射角 α 方向投射到基元 1 和 2 上, 它们接收到的归一化声压分别为

$$V_1 = e^{-j\varphi_1}, \quad V_2 = e^{-j\varphi_2}$$

合成声压 $V = V_1 + V_2$ 的振幅为

$$|V| = |V_1 + V_2| = 2\cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)$$

由图1.2可知, 当两基元的距离为 d 、入射角为 α 时, 声程差 ξ 可表示为

$$\xi = d \sin \alpha$$

因此相位差 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = \frac{\omega\xi}{c} = \frac{\omega d}{c} \sin \alpha$$

所以

$$|V| = 2\cos\left(\frac{\omega d}{2c} \sin \alpha\right)$$

由上式可以说明, 迭加后的振幅是随 α 的变化而呈现极大、极小值的。

推广到更多个接收基元的情况, 有

$$|V| = \left| \sum_{i=1}^M e^{-j\varphi_i} \right|$$

其中 M 为基元数; φ_i 为第 i 个基元接收声压的相位(相对于某一固定参考点而言), 它可表示为

$$\varphi_i = k r_i = \frac{2\pi}{\lambda} r_i = 2\pi f r_i / c = \omega \tau_i$$

式中, r_i 为第 i 个基元的坐标位置; τ_i 为第 i 个基元的接收声压相对于固定参考点的时延。

如果接收基阵是间距为 d 的均匀线阵, 那么经过计算就可以得到

$$|V| = \frac{\sin\left(\frac{M\pi}{\lambda} d \sin \alpha\right)}{M \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \alpha\right)} \quad \begin{array}{l} M=2, \text{ 即可?} \\ \text{【已经归一化】} \end{array}$$

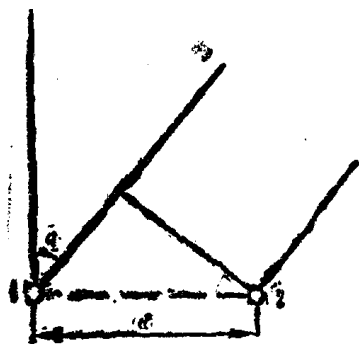


图 1.2

当 $\alpha=0$ 时, $|V|$ 具有极大值, 即 $|V|=1$ 。

基元所接收的声压具有不同的相位, 且对各基元接收的声压经接收系统进行线性迭加, 就可以得到基阵的方向性。

§ 1.4 极大值的出现和波束形成

前面已经提及, 对各基元不同相位的声压经接收系统进行线性迭加, 产生接收基阵方向性。一般说来, 基阵可能有一定规则的几何形状, 也可能没有规则。由于排列的方式可以是任意的, 要真正产生实际应用的、具有明显极大值的方向性图, 通常不一定可能。例如, 线阵是均匀排列在一条直线上, 它是有方向性的, 当 $\alpha=0$ 时(入射角在沿声轴方向)具有明显的极大值。但是, 圆形基阵在各基元间虽有明显的相位差, 却不能出现明显的极大值方向。通常都必须对基元进行相位补偿, 才能使得在我们希望的方向上产生极大值(达到同相迭加)。而偏离极大值方向时, 各基元间相位差不是同相的, 因此迭加后的幅值必然小于极大值, 这样就可以形成一个波束。给出不同的相位补偿就可以在不同方位上形成波束。对于线阵这种相位补偿也是必要的。

因为若不进行相位补偿, 就只能在 $\alpha=0$ 的方向上产生极大值。当我们对目标进行搜索、跟踪时, 也就是说, 需要控制和改变极大值的方向时, 这种相位补偿就必不可少了。

总之, 为了形成波束, 必须对所希望出现的主瓣方向进行相位补偿, 而后对具有相位差的基元声压进行线性迭加。

为了具体计算方向性图, 我们首先确定希望得到的主瓣方向。其次计算在该方向上产生同相迭加条件, 对每个基元进行相位补偿。然后计算偏离主瓣方向的每一基元所接收到